

基于相位调制的高相干光源照明匀化方法

魏嘉昕¹⁾²⁾ 沙鹏飞¹⁾²⁾ 方旭晨¹⁾²⁾ 卢增雄¹⁾²⁾

李慧¹⁾²⁾ 谭芳蕊¹⁾ 吴晓斌^{1)2)†}

1) (中国科学院微电子研究所, 光电技术研发中心, 北京 100029)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2024年5月8日收到; 2024年6月11日收到修改稿)

蝇眼透镜被用于高相干性激光的整形匀化时, 会产生多子光束干涉现象导致照明面光强呈现梳状分布. 本文建立了一种蝇眼随机相位调制匀化系统仿真模型, 对蝇眼透镜子光束进行随机相位调制, 并统计平均多次照明光强. 理论和仿真分析证明该方法可以有效地消除干涉图案, 提高照明均匀性. 进一步展示了蝇眼透镜子孔径和焦距对该系统匀化效果的影响, 并通过优化系统参数和结构, 减弱了蝇眼透镜衍射效应的影响, 提高了匀化效果, 最终在 100 mm^2 的方形区域内实现了不均匀性小于 1.2% 的均匀照明.

关键词: 高相干光, 匀化, 蝇眼透镜, 相位调制

PACS: 41.85.Ct, 03.65.Yz, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.73.20240644

1 引言

激光是一种高相干性光源^[1], 被广泛用于激光显示^[2,3]、激光照明^[4]、激光加工^[5]和激光精密检测^[6]等对照明均匀性有较高要求的领域. 蝇眼透镜^[7]常被用于照明光束匀化, 一种将蝇眼透镜与聚焦透镜结合以获得平顶照明轮廓的匀化系统结构^[8]已被大家熟知. 然而蝇眼透镜系统用于高相干光源照明匀化, 会由于各子光束相干叠加而产生干涉图案, 在照明面表现为具有强振荡的周期性斑点分布^[9], 这反而破坏了照明的均匀性.

准分子激光^[10-12]和 LED 光源^[13]等相干性较差的光源可以减弱干涉条纹问题. 或是在分辨率要求不高的应用场景下, 干涉图案无法被图像探测器解析^[14,15]. 然而在使用高相干激光光源且分辨率要求较高的情况下, 蝇眼透镜产生的干涉条纹不能忽略, 故需要消相干. 非规则形状阵列^[16-19]等对蝇眼透镜特异性加工的方法可以打乱相位分布, 减弱干

涉条纹影响, 但设计和加工难度较高. 诱导空间不相干法^[20,21]通过相位调制板使各子光束的时间延迟大于相干时间消除干涉现象, 但不适用于相干时间较长的激光器. 在扩束系统中插入旋转漫射体^[22]可以使光源消相干, 但漫射体能量损耗较高. 在蝇眼透镜后使用旋转光学相移板并时间延迟积分可以消除干涉图案^[23], 但先前的研究仅展示了工程实现效果, 未对该方法的技术细节进行分析. 对于相位调制并统计平均的蝇眼透镜匀化系统, 仍缺少更详细的理论分析和技术指导.

本文深入研究了基于蝇眼透镜的激光照明匀化方法, 建立了一种对蝇眼透镜子光束进行随机相位调制并统计平均的光束匀化系统仿真模型, 理论分析和数学仿真证明可以消除传统蝇眼透镜光束匀化系统中多子光束干涉效应的影响. 最后对该模型进行参数调节和结构优化, 成功提高了高相干性激光器的照明均匀性, 并为实际的蝇眼透镜匀化系统搭建提供指导.

† 通信作者. E-mail: wuxiaobin@ime.ac.cn

2 蝇眼透镜光束匀化理论研究

2.1 传统蝇眼透镜匀化系统

常用的蝇眼透镜光束匀化系统分为两类: 衍射型 (diffracting-type) 和成像型 (imaging-type). 本节详细介绍蝇眼透镜光束匀化系统的结构, 并结合衍射理论和傅里叶光学进行数学分析及理论研究.

传统衍射型蝇眼透镜匀化系统由蝇眼透镜 (L_A) 和聚焦透镜 (L_F) 组成, 如图 1(a) 所示. 其工作原理是通过 L_A 将不均匀的输入光分割成相对均匀的子光束, 各子光束产生形状相似的衍射光斑并叠加在聚焦透镜的后焦面, 从而将不均匀的输入光束整形为直径为 D 的平顶照明光.

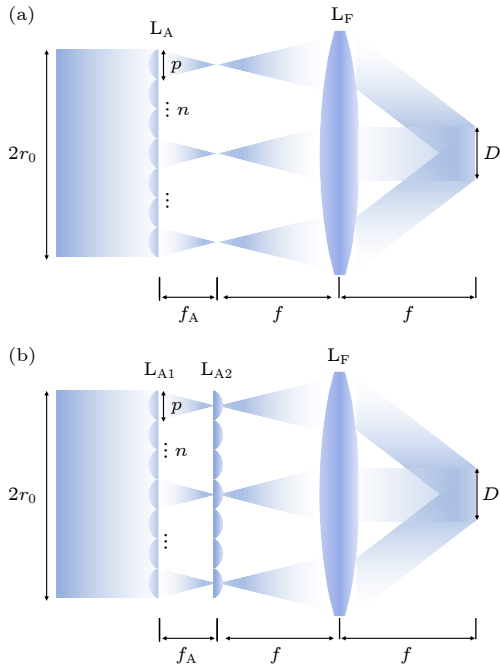


图 1 传统蝇眼透镜匀化系统光路图 (a) 衍射型; (b) 成像型

Fig. 1. Schematic diagram of conventional fly's eye lens homogenization system: (a) Diffracting-type; (b) imaging-type.

为方便运算, 本文对二维蝇眼透镜仅做一维分析, 一束复振幅分布为 U_0 、半径为 r_0 的准直光束入射到子透镜数为 $n \times n$ 的蝇眼透镜上, 每个正方形子透镜孔径为 p 、焦距为 f_A , 子光束经过焦距为 f 的聚焦透镜并在其后焦面处重叠. 蝇眼透镜透过率函数 T_A 是所有子透镜透过率函数 T_L 的累加, 假设阵列数为 $2N + 1$, 令波数 $k = 2\pi/\lambda$, 则 T_A 为

$$T_A(r) = \sum_{n=-N}^N \delta(r - np) * T_L(r) = \sum_{n=-N}^N \delta(r - np) * \left\{ \text{rect}\left(\frac{r}{p}\right) \exp\left(-j\frac{k}{2f_A}r^2\right) \right\}. \quad (1)$$

对于传统衍射型蝇眼透镜匀化系统, 聚焦透镜后焦面上的复振幅分布 $U_f(r_f)$ 是经过蝇眼透镜调制的入射波前的傅里叶变换^[24], 则照明面光强分布为

$$I_{\text{diff}} \propto |U_f(r_f)|^2 \propto |\mathbb{F}\{U_0(r)T_A(r)\}|^2 = |\mathbb{F}\{U_0(r)\} * \mathbb{F}\{T_A(r)\}|^2. \quad (2)$$

成像型蝇眼透镜匀化系统由两个相同的蝇眼透镜 (L_{A1} 和 L_{A2}) 和一个正聚焦透镜 (L_F) 组成, 如图 1(b) 所示. L_{A1} 对光束进行分割, L_{A2} 作为场镜与聚焦透镜相结合形成 L_{A1} 子孔径的真实图像并在照明面重叠. 相比于衍射型蝇眼透镜匀化系统, 成像型蝇眼透镜匀化系统的衍射效应更小.

对成像型蝇眼透镜匀化系统进行一维分析. 设两个蝇眼透镜透过率函数分别为 T_{A1} , T_{A2} , 焦距分别为 f_{A1} , f_{A2} , 则聚焦透镜后焦面上的光场分布为 U_{A2} 的傅里叶变换:

$$I_{\text{imag}} \propto |U_f(r_f)|^2 \propto |\mathbb{F}[U_{fA1}] * \mathbb{F}[T_{A2}]|^2 = \left| \mathbb{F}\{U_0\} * \mathbb{F}\{T_{A1}\} \exp[-j\pi\lambda f_{A1} f_r^2] \right|^2 * \mathbb{F}[T_{A2}]|^2. \quad (3)$$

为分析衍射轮廓和干涉条纹的产生机理, 以输入 $U_0 = 1$ 为例, 衍射型蝇眼透镜匀化系统照明面光强分布为

$$I_{\text{diff}} = |\mathbb{F}\{T_A(r)\}|^2. \quad (4)$$

进一步展开, 则:

$$\begin{aligned} \mathbb{F}\{T_A(r)\} &= \mathbb{F}\left\{ \sum_{n=-N}^N \delta(r - np) * \left\{ \text{rect}\left(\frac{r}{p}\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \exp\left(-j\frac{k}{2f_A}r^2\right) \right\} \right\} \\ &= \frac{\sin[(2N+1)\pi p f_r]}{\sin[\pi p f_r]} \\ &\quad \times \mathbb{F}\left\{ \text{rect}\left(\frac{r}{p}\right) \exp\left(-j\frac{k}{2f_A}r^2\right) \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中空间频率 $f_r = \frac{r_f}{\lambda f}$. (5) 式中 $\frac{\sin[(2N+1)\pi p f_r]}{\sin[\pi p f_r]}$ 与多缝干涉光强分布类似, 称之为多光束干涉因子; $\mathbb{F}\left\{ \text{rect}\left(\frac{r}{p}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{k}{2f_A}r^2\right) \right\}$ 是单个子透镜透过率函数的傅里叶变换, 称之为单子透镜衍射因子.

衍射型蝇眼透镜匀化系统的照明面光强分布是多光束干涉因子和单透镜衍射因子的乘积, 其中干涉项造成了照明面光强的梳状分布, 衍射项决定了光强整体分布的轮廓.

单个子透镜的衍射图样决定了照明面光斑的形状. 对于衍射型蝇眼透镜匀化系统, 菲涅耳数对应着衍射轮廓中的波峰数, 随着菲涅耳数的增加, 衍射轮廓越接近平顶分布. 蝇眼透镜的菲涅耳数 F ^[7] 近似地由 (6) 式给出:

$$F = \frac{p^2}{4\lambda f_A}. \quad (6)$$

更重要的是, 高相干光源在聚焦透镜后焦面上产生的强度分布模式由干涉效应主导, 其特征是具有细密周期的大幅度波动, 近似梳状函数分布, 干涉图样的周期 P 表示为^[7]

$$P = \lambda f/p. \quad (7)$$

2.2 蝇眼随机相位调制匀化系统

本文在传统蝇眼透镜匀化系统的基础上, 建立了蝇眼透镜随机相位调制匀化系统模型 (如图 2 所示). 遍布随机深度凹坑的旋转石英玻璃圆盘^[23] 作为随机相位调制板 (L_D) 置于第 1 个蝇眼透镜后焦面上, 分割后的子光束经过 L_D 进行相位调制, 衍射光斑在焦距为 f 的聚焦透镜后焦面处重叠. 随机相位调制破坏了蝇眼透镜各子光束间的相干条件, 多次不同调制的照明光强进行统计平均, 从而消除干涉图案.

对每个子光束随机相位调制, 设 $\text{Rand}(n)$ 为 0 到 1 之间均匀分布的随机数, 则第 n 个子光束引入的随机相位调制为

$$T_{Dn} = \exp(-i2\pi \text{Rand}(n)). \quad (8)$$

对于有 $2N + 1$ 个子透镜的蝇眼透镜, 其对应的相位调制元件的透过率函数可表示为

$$T_D = \sum_{n=-N}^N \delta(r - np) * \{\text{rect}(r/p) * \exp(-i2\pi \text{Rand}(n))\}. \quad (9)$$

对于衍射型蝇眼随机相位调制匀化系统, 经过一次随机相位调制的照明面分布为

$$U_{\text{F-diff}} = \{\mathbb{F}[U_0] * \mathbb{F}[T_A] \exp[-j\pi\lambda f_A f_r^2] * \mathbb{F}[T_D]\}. \quad (10)$$

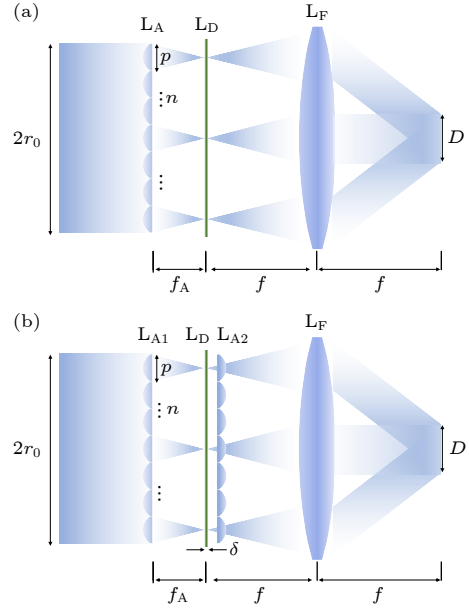


图 2 蝇眼随机相位调制匀化系统光路图 (a) 衍射型; (b) 成像型

Fig. 2. Schematic diagram of the fly's eye random phase modulation homogenization system: (a) Diffracting-type; (b) imaging-type.

对于成像型蝇眼随机相位调制匀化系统, 经过一次随机相位调制的照明面分布为

$$U_{\text{F-imag}} = \{\mathbb{F}[U_0] * \mathbb{F}[T_{A1}] \exp[-j\pi\lambda f_{A1} f_r^2] * \mathbb{F}[T_D] * \mathbb{F}[T_{A2}]\}. \quad (11)$$

在实际光路中, 实现随机相位调制的元件具有一定厚度, 使第 2 个蝇眼不能处于第 1 个蝇眼的后焦面处, 且第 2 个蝇眼透镜放在第 1 个蝇眼的后焦面也可能被聚焦的激光损伤, 所以第 2 个蝇眼透镜需要略微离焦, 如图 2(b) 所示. 假设离焦量为 δ , 则改进后的成像型匀化系统照明面分布为

$$U_{\text{F-imag}} = \{\{\mathbb{F}[U_0] * \mathbb{F}[T_{A1}] \exp[-j\pi\lambda f_{A1} f_r^2] * \mathbb{F}[T_D] \exp[-j\pi\lambda \delta f_r^2]\} * \mathbb{F}[T_{A2}]\}. \quad (12)$$

若要消除干涉图案, 还需将多次独立的调制结果进行光强累加以统计平均, 叠加 M 次的照明光强为

$$I = \sum_{m=1}^M |U_{\text{Fm}}|^2. \quad (13)$$

3 蝇眼透镜光束匀化仿真

根据上述理论, 本文使用 MATLAB 对传统蝇眼透镜匀化系统和蝇眼随机相位调制匀化系统进

行了数值仿真. 匀化效果的评价函数使用照明面光强的相对均方根误差^[25], 相对均方根误差(不均匀性)越小, 匀化效果越好. 不均匀性 σ 定义为

$$\sigma = \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(I_i - \bar{I})^2}{N}} \times 100\%, \quad (14)$$

式中 \bar{I} 为匀化光斑的平均能量, I_i 为各采样点的能量, N 为采样点个数.

3.1 传统蝇眼透镜光束整形系统

对图 1 中的传统蝇眼透镜匀化系统进行仿真. 入射光设置为输入半径 $r_0 = 5$ mm、波长 $\lambda = 266$ nm 的单色高斯光束, 振幅分布 $U_0 = \exp(-r^2/\omega_0^2)$, 截面半径 $\omega_0 = 3$ mm. 蝇眼透镜子孔径 $p = 0.3$ mm、焦距 $f_A = 5$ mm、阵列数 $n = 33$, 聚焦透镜焦距 $f = 50$ mm, 仿真条件为完全相干, 结果见图 3.

图 3(a) 展示了衍射型蝇眼匀化系统照明面一维光强分布及其局部放大图. 照明面由密集的干涉条纹构成, 光强不均匀性高达 420%; 其衍射轮廓包含 17 个起伏较大且不规律的波峰, 波峰数等于菲涅耳数, 满足 (6) 式的结论, 且轮廓边缘有一定的倾斜角. 干涉条纹间距大约 0.044 mm, 与 (7) 式的计算相吻合.

图 3(b) 展示了成像型蝇眼透镜匀化系统照明面一维光强分布图及其局部放大图. 成像型系统照明面也会产生密集的干涉条纹, 光强不均匀性高达 414%; 其衍射轮廓具有周期性波动分布, 波峰数为 34 等于两倍的非涅尔数, 但波动幅度较小,

整体轮廓接近平顶分布; 轮廓边缘十分锐利, 近似垂直, 宽度大约 3 mm. 干涉条纹间距约为 0.044 mm, 同样满足 (7) 式. 衍射型和成像型系统产生的干涉条纹相似, 图 3(c) 为梳状干涉图案的二维局部放大图, 可以直观地看出其不均匀特性.

传统蝇眼透镜匀化系统仿真结果表明, 无论衍射型还是成像型都存在明显的衍射和干涉效应, 且干涉图案暗部占空比较大, 不满足照明均匀性要求. 虽然成像型蝇眼匀化系统可以优化衍射轮廓, 使衍射轮廓更接近平顶分布, 但是仍存在干涉条纹问题, 因此仅通过传统蝇眼透镜匀化系统无法让高相干性激光器获得高均匀性的照明, 甚至比激光器本身的光强均匀性更差, 故需要其他手段消除干涉条纹以提高照明光强均匀性.

3.2 衍射型蝇眼随机相位调制匀化系统

根据 (10) 式对图 2(a) 中的衍射型蝇眼随机相位调制匀化系统进行仿真, 结果如图 4 所示. 随着多次调制的照明光强不断叠加, 照明面光强分布的波动幅度明显减小, 干涉图案逐渐消失, 光强分布越来越接近子透镜衍射轮廓.

在消除干涉条纹的基础上, 若想进一步提高匀化效果, 则需要优化衍射轮廓, 而蝇眼透镜的衍射效应主要由子孔径和焦距决定. 本文通过仿真分析子孔径 p 对匀化效果的影响, 保持子透镜焦距 $f_A = 5$ mm 不变, 比较不同子孔径的情况下获得的匀化效果差别. 需要强调的是, 在入射光尺寸有限的情况下, p 越大, 有效的子透镜数 N 越少.

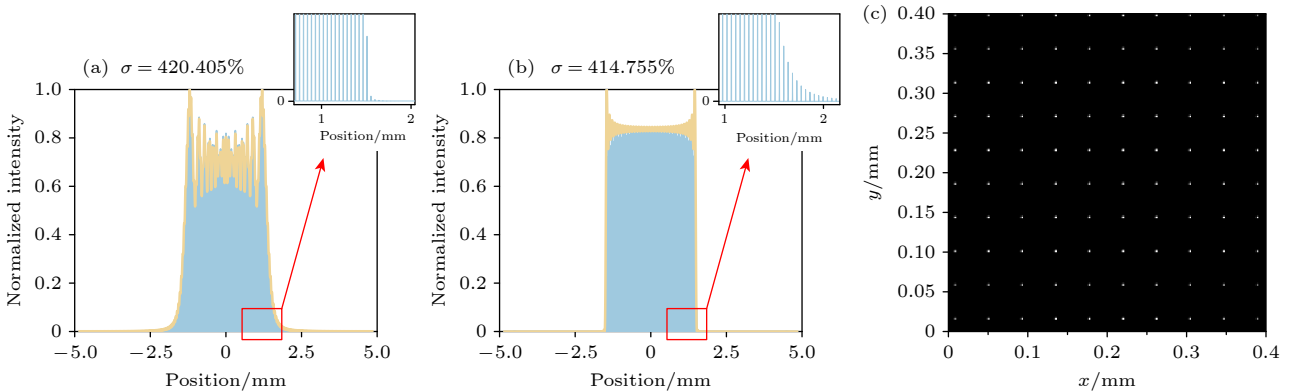


图 3 传统蝇眼透镜匀化系统仿真结果 (a) 衍射型系统照明面一维光强分布图和局部放大图; (b) 成像型系统照明面一维光强分布图和局部放大图; (c) 干涉图案二维局部放大图

Fig. 3. Simulation results of a conventional fly's eye lens homogenization system: (a) One-dimensional (1D) intensity distribution at the illumination surface of a diffracting-type system and its partial enlarged image; (b) 1D intensity distribution at the illumination surface of an imaging-type system and its partial enlarged image; (c) two-dimensional (2D) localized enlargement of the interference pattern.

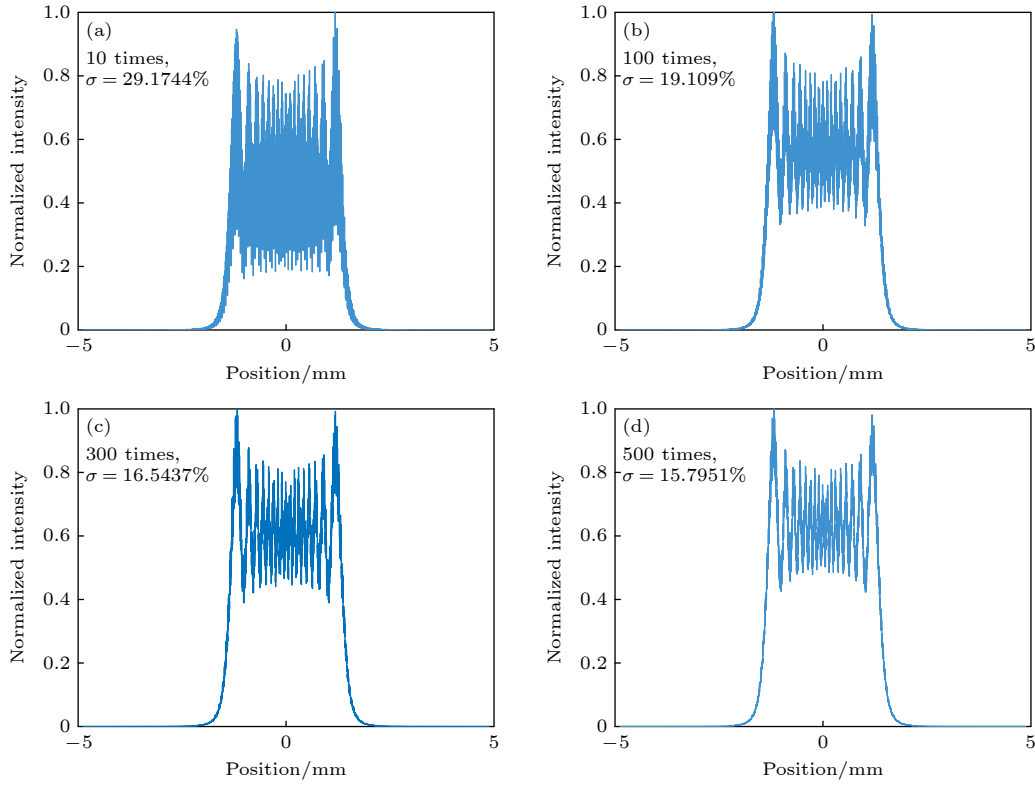


图 4 衍射型蝇眼随机相位调制匀化系统消相干效果 (a) 累加 10 次; (b) 累加 100 次; (c) 累加 300 次; (d) 累加 500 次
 Fig. 4. Decoherence effects of a diffracting type fly's eye random phase modulation homogenization system: (a) Cumulative 10 times; (b) cumulative 100 times; (c) cumulative 300 times; (d) cumulative 500 times.

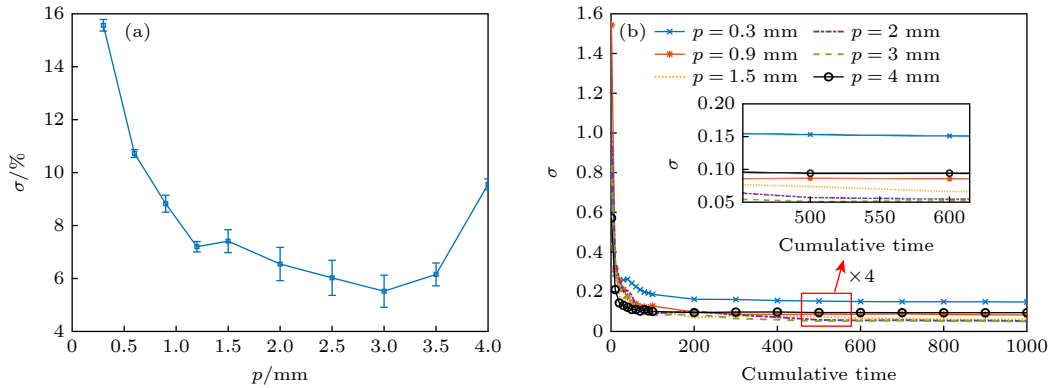


图 5 不同子孔径下衍射型系统的匀化效果比较 (a) 不均匀性随子孔径的变化; (b) 不均匀性随叠加次数的变化
 Fig. 5. Comparison of homogenization effects of diffracting-type systems with different p : (a) The variation of non-uniformity with p ; (b) the variation of non-uniformity with cumulative times.

衍射型蝇眼随机相位调制匀化系统的仿真结果如图 5 和图 6 所示. 图 5(a) 展示了在叠加 500 次的情况下, 照明不均匀性随子孔径变化的规律: p 从 0.3 mm 增大到 3 mm 时, 不均匀性下降; p 大于 3 mm 时, 不均匀性上升. 图 5(b) 展示了衍射型系统照明不均匀度随叠加次数的变化规律, 叠加次数对均匀度的影响越来越小, 当叠加次数超过 300 次时, 匀化效果基本达到最佳水平. 图 6 比较了不同 p 值的系统叠加 500 次后的照明面光强分

布. 可以看出, 随着子孔径增大, 波峰数更多更密集且波动幅度减小, 不均匀性下降; 当子孔径大于 2 mm 时, 光强分布发生畸变, 无法消除入射光高斯分布的影响, 这又使匀化效果变差. 故对于截面半径 3 mm 的高斯输入光, 蝇眼子孔径在 2 mm 左右较为合适.

蝇眼透镜的衍射效应还与蝇眼透镜焦距 f_A 有关, 本文仿真分析了蝇眼透镜焦距 f_A 对匀化效果的影响, 保持子孔径 $p = 0.9$ mm 不变, 比较不同

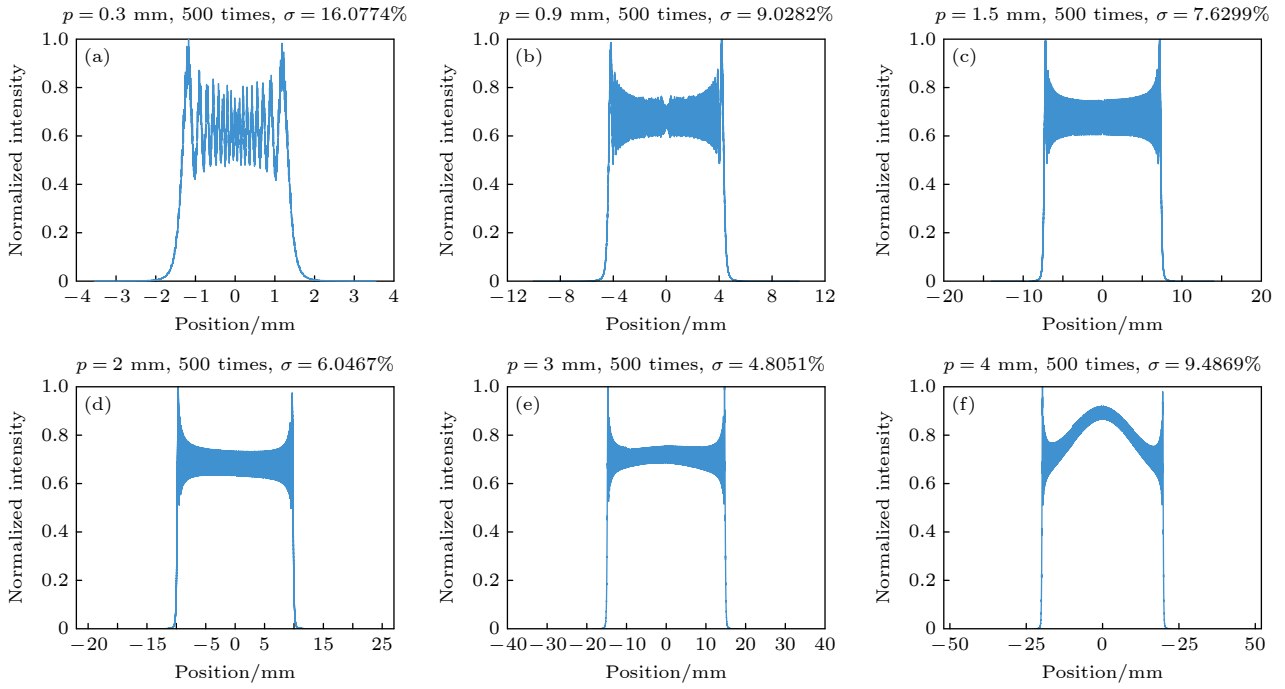


图 6 不同子孔径的衍射型系统的照明面光强分布 (a) $p = 0.3$ mm; (b) $p = 0.9$ mm; (c) $p = 1.5$ mm; (d) $p = 2$ mm; (e) $p = 3$ mm; (f) $p = 4$ mm

Fig. 6. Illumination intensity distribution of diffracting-type systems with different p : (a) $p = 0.3$ mm; (b) $p = 0.9$ mm; (c) $p = 1.5$ mm; (d) $p = 2$ mm; (e) $p = 3$ mm; (f) $p = 4$ mm.

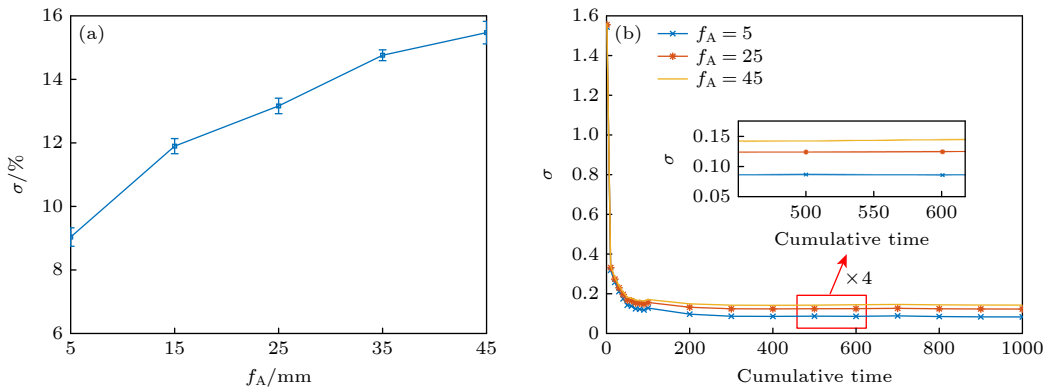


图 7 不同子透镜焦距下衍射型系统的匀化效果 (a) 不均匀性随子孔径焦距的变化; (b) 不均匀性随叠加次数的变化

Fig. 7. Comparison of homogenization effects of diffracting-type systems with different f_A : (a) The variation of non-uniformity with f_A ; (b) the variation of non-uniformity with cumulative times.

蝇眼透镜焦距下的匀化效果. 仿真结果如图 7 和图 8 所示, 在相同的叠加次数下, 蝇眼透镜焦距越大, 衍射波峰数越少越稀疏, 光束匀化效果越差. 需要注意的是, 实际应用中受限于光学加工的能力, 子透镜焦距无法做到很小; 虽然较大的子孔径有利于匀化, 但实际生产的大子孔径蝇眼透镜往往焦距也很大, 这反而不利于匀化.

综上所述, 对衍射型蝇眼匀化系统产生的不同相位调制的输出光强进行叠加, 随着叠加次数增加匀化效果也会提高, 叠加 300 次后均匀性提高速度缓慢. 在一定范围内子孔径越大, 匀化效果越好,

但子孔径过大会无法消除入射光强分布的影响, 使均匀性变差; 子透镜焦距越小, 匀化效果越好. 根据上述仿真结果, 使用 $p = 2$ mm, $f_A = 10$ mm 的蝇眼透镜构建衍射型蝇眼随机相位调制匀化系统, 进行 500 次随机相位调制和叠加, 最终在 100 mm^2 的方形照明区域内获得照明不均匀度低至 5.6%, 其照明光强分布如图 9 所示.

3.3 成像型蝇眼随机相位调制匀化系统

根据 (11) 式对图 2(b) 中的成像型蝇眼随机相位调制系统进行仿真, 设 $p = 0.3$ mm, $f_A = 5$ mm,

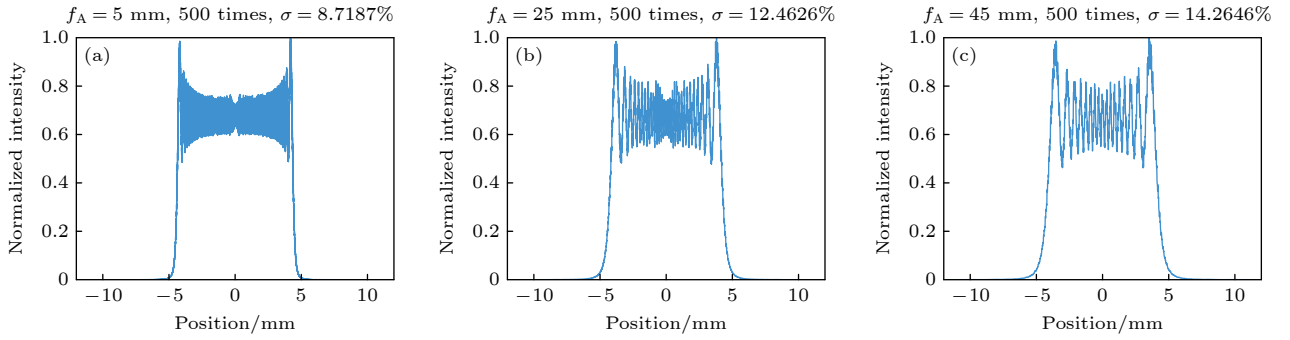

 图 8 不同子透镜焦距的衍射型系统照明光强分布 (a) $f_A = 5$ mm; (b) $f_A = 25$ mm; (c) $f_A = 45$ mm

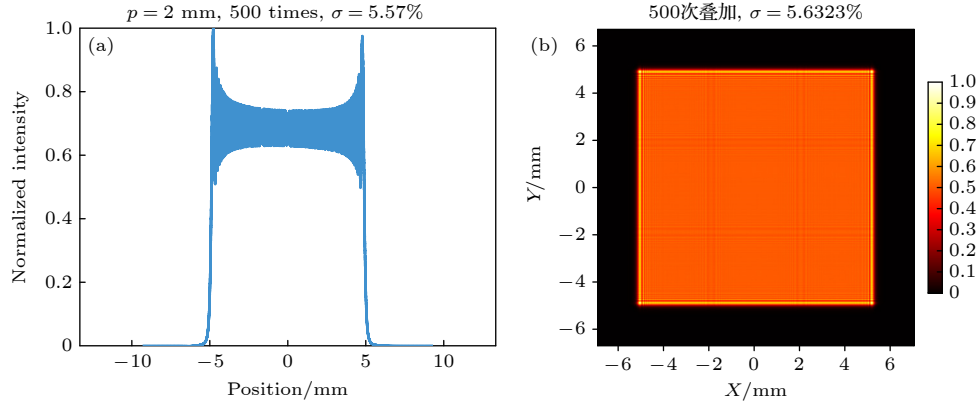
 Fig. 8. Illumination intensity distribution of diffracting-type systems with different f_A : (a) $f_A = 5$ mm; (b) $f_A = 25$ mm; (c) $f_A = 45$ mm.

 图 9 $p = 2$ mm, $f_A = 10$ mm 的衍射型匀化系统的照明光强分布 (a) 一维光强分布图; (b) 二维光强分布图

 Fig. 9. Illumination intensity distribution of a diffracting-type homogenizing system with $p = 2$ mm and $f_A = 10$ mm: (a) 1D distribution of intensity; (b) 2D distribution of intensity.

仿真结果如图 10 所示. 与图 4 结论类似, 随着多次独立调制的光强不断叠加, 照明面光强分布的干涉波动幅度明显减小, 相干条纹逐渐消失, 光强分布越来越接近衍射轮廓.

仿真分析蝇眼透镜子孔径 p 对匀化效果的影响, 保持蝇眼透镜焦距 $f_A = 5$ mm 不变, 比较不同子孔径的成像型匀化系统获得的光强均匀度差别, 仿真结果如图 11 所示. 图 11(a) 展示了叠加 1000 次的情况下, 成像型蝇眼随机相位调制匀化系统照明均匀性随子孔径变化的规律: p 从 0.3 mm 增大到 2 mm 时, 不均匀性逐渐变低; p 大于 2 mm 后, 不均匀性变高. 图 11(b) 展示了成像型系统照明不均匀性随叠加次数变化的规律, 当叠加次数超过 600 次时, 匀化效果基本达到最佳且变化趋于平稳. 图 12 展示了不同蝇眼透镜子孔径的成像型系统照明面光强分布. 可以看出, 当 p 增大, 光强波动减小, 不均匀性下降; 而当 p 大于 2 mm 时, 照明轮廓发生恶化, 无法消除输入光强高斯分布的影响, 使匀化效果变差. 故成像型匀化系统也需要将子透

镜的孔径限定在合理范围内.

仿真分析蝇眼透镜焦距 f_A 对成像型系统匀化效果的影响, 保持子孔径 $p = 0.9$ mm 不变, 比较不同蝇眼透镜焦距下的匀化效果. 仿真结果如图 13 和图 14 所示, f_A 对成像型系统匀化效果的影响很小, f_A 增大照明不均匀性只有微弱的升高.

传统的成像型蝇眼透镜光束匀化系统使用两个完全一样的蝇眼透镜, 且第 2 个蝇眼透镜在第 1 个蝇眼透镜的后焦面上. 有些情况下, 比如需要在两个蝇眼透镜之间插入随机相位调制元件, 第 2 个蝇眼透镜需要略微离焦, 如图 2(b) 所示. 如果保持原蝇眼透镜参数仅做简单的离焦, 则会导致照明面光强分布变形, 见图 15(b), 其匀化效果比传统结构 (图 15(a)) 明显要差. 为了解决该问题, 需要合理调整蝇眼透镜的焦距, 使得第 1 个蝇眼透镜位于第 2 个蝇眼透镜的前焦面处, 保持系统满足成像条件, 则 $f_{A2} = f_{A1} + \delta$, 同时根据 f_{A2} 调整聚焦透镜焦距 f , 以保持照明面尺寸不变. 当离焦量较小时, 该方法产生的照明面光强分布与传统结构相

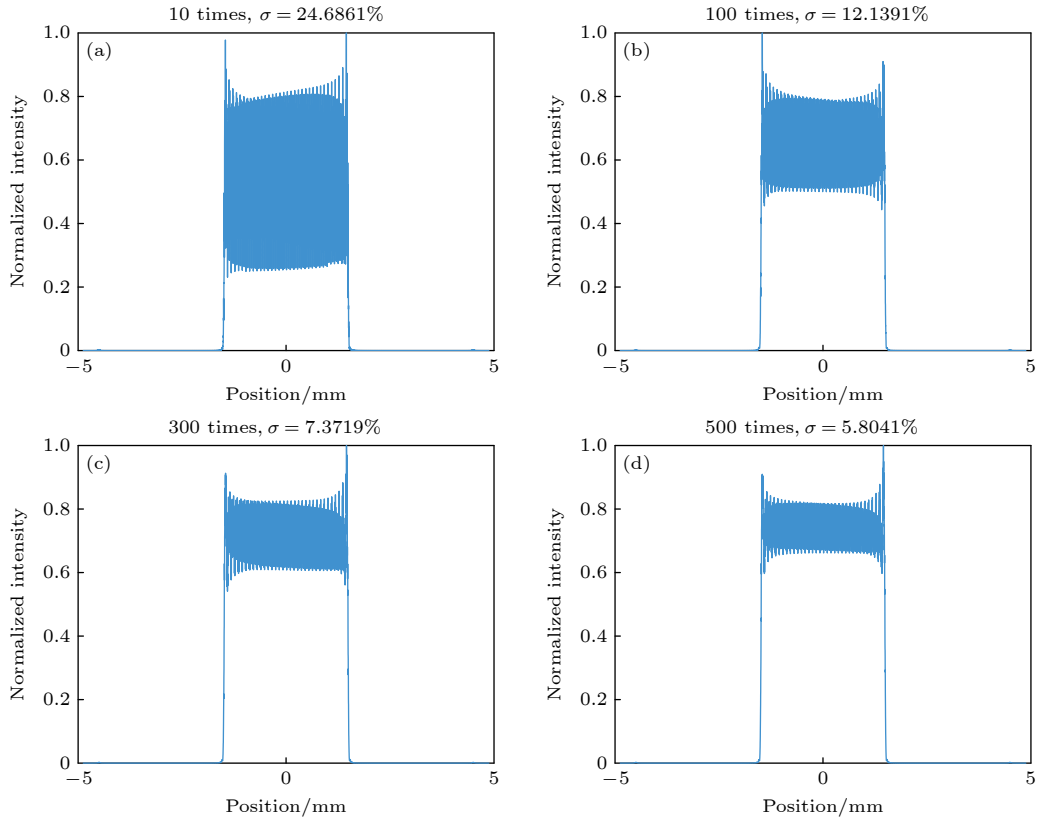


图 10 成像型蝇眼随机相位调制匀化系统消相干效果 (a) 叠加 10 次; (b) 叠加 100 次; (c) 叠加 300 次; (d) 叠加 500 次
 Fig. 10. Decoherence effects of a imaging-type fly's eye random phase modulation homogenization system: (a) Cumulative 10 times; (b) cumulative 100 times; (c) cumulative 300 times; (d) cumulative 500 times.

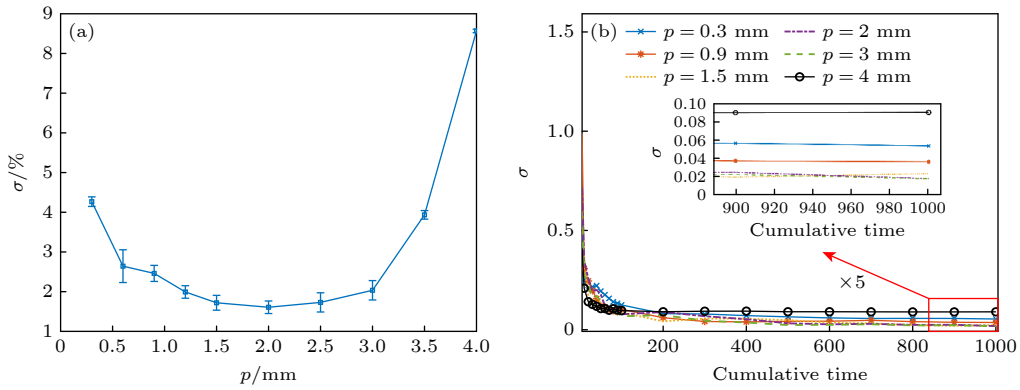


图 11 不同子孔径下成像型系统的匀化效果比较 (a) 不均匀性随子孔径的变化; (b) 不均匀性随叠加次数的变化
 Fig. 11. Comparison of homogenization effects of imaging-type systems with different p : (a) The variation of non-uniformity with p ; (b) the variation of non-uniformity with cumulative times.

同, 不均匀性基本相等, 见图 15(c). 需要注意的是, L_{A1} 的每一个子光束都必须限制在 L_{A2} 相应的子孔径内, 因此 L_{A2} 离焦量不能超过 L_{A1} 的焦距 f_{A1} , 否则各子光束混叠导致照明面光强分布发生畸变, 降低匀化效果, 如图 16 所示. 图 16(a) 表明, 离焦量较小时, 离焦配置对均匀性影响较小, 当离焦量大于或等于 f_{A1} 时, 不均匀性明显升高; 图 16(b) 展示了离焦量等于 f_{A1} , 即 $\delta = 9 \text{ mm}$ 时的照明面

光强分布, 此时已产生明显的畸变. 因此在实际应用中, 需要根据实际系统装调的要求, 选择合适的离焦量和蝇眼透镜焦距, 从而保证光束匀化的效果. 这种离焦排布的成像型系统对蝇眼透镜焦距变化不敏感、离焦量可调控范围大, 且降低了蝇眼透镜表面的功率密度, 提高了损伤阈值, 具有较高的可实现性.

综上所述, 对成像型蝇眼透镜光束匀化系统进

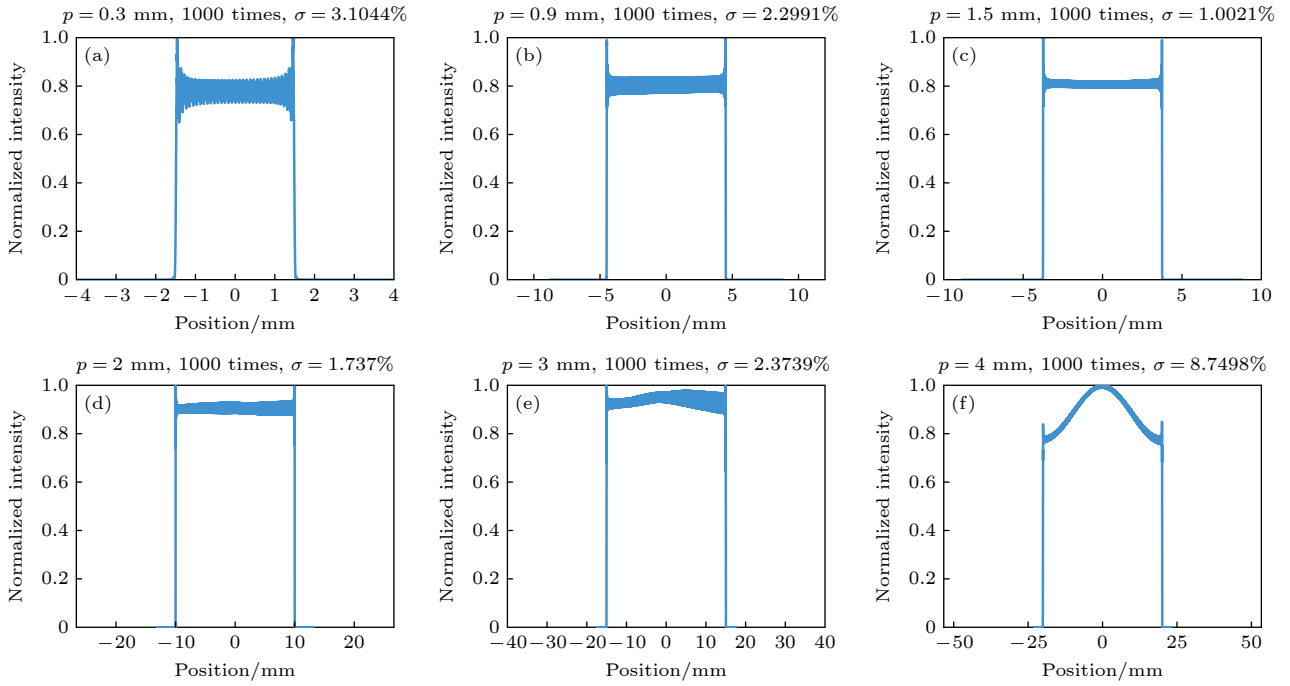


图 12 不同子孔径的成像型系统的照明面光强分布 (a) $p = 0.3$ mm; (b) $p = 0.9$ mm; (c) $p = 1.5$ mm; (d) $p = 2$ mm; (e) $p = 3$ mm; (f) $p = 4$ mm

Fig. 12. Illumination intensity distribution of imaging-type systems with different p : (a) $p = 0.3$ mm; (b) $p = 0.9$ mm; (c) $p = 1.5$ mm; (d) $p = 2$ mm; (e) $p = 3$ mm; (f) $p = 4$ mm.

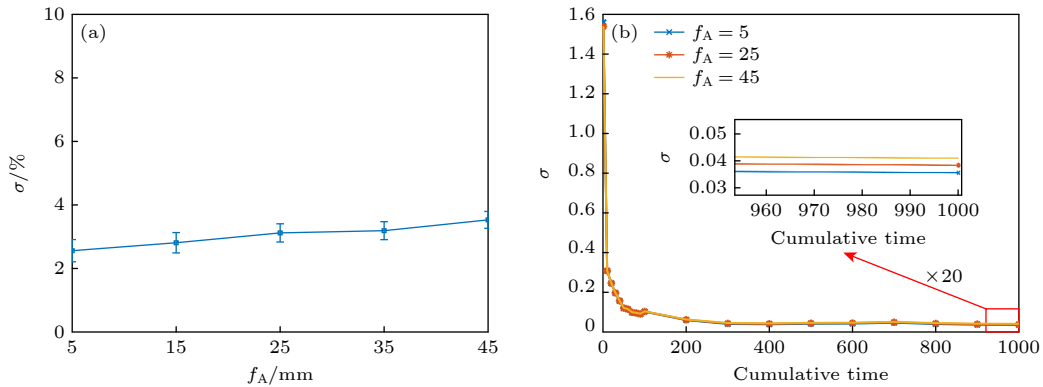


图 13 不同子透镜焦距下成像型系统的匀化效果 (a) 不均匀性随子透镜焦距的变化; (b) 不均匀性随叠加次数的变化

Fig. 13. Comparison of homogenization effects of imaging-type systems with different f_A : (a) The variation of non-uniformity with f_A ; (b) the variation of non-uniformity with cumulative times.

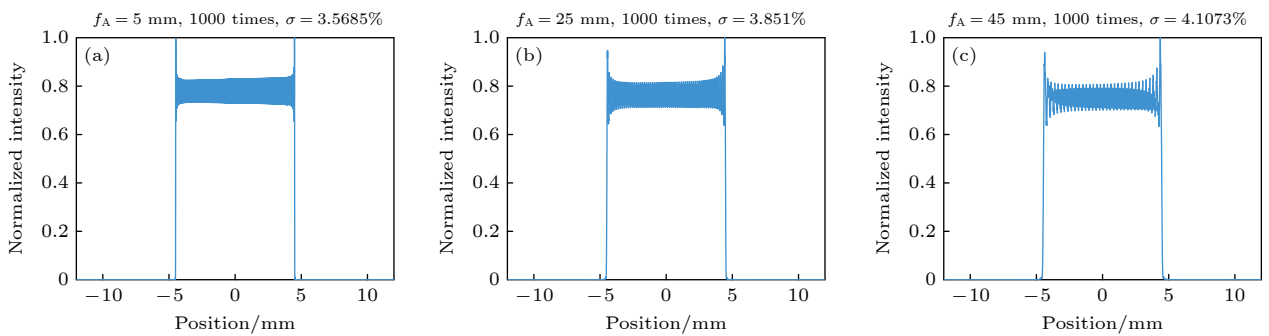


图 14 不同子透镜焦距的成像型系统照明面光强分布 (a) $f_A = 5$ mm; (b) $f_A = 25$ mm; (c) $f_A = 45$ mm

Fig. 14. Illumination intensity distribution of imaging-type systems with different f_A : (a) $f_A = 5$ mm; (b) $f_A = 25$ mm; (c) $f_A = 45$ mm.

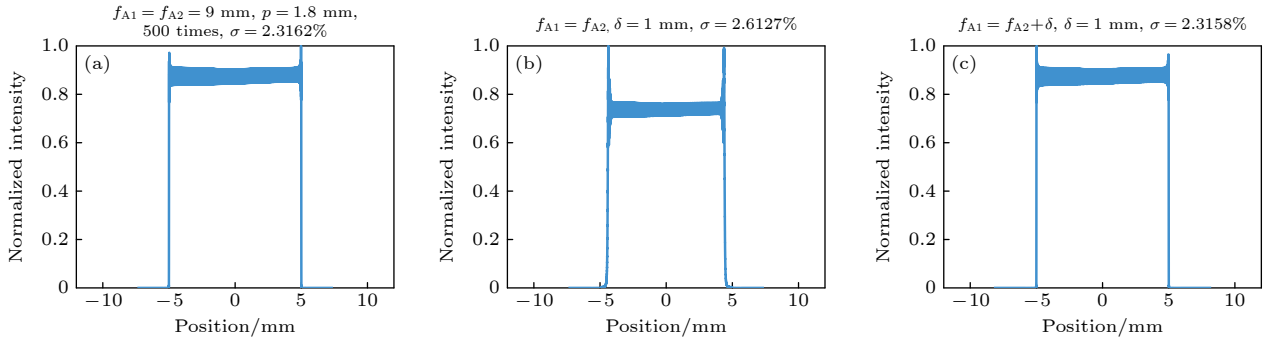


图 15 传统结构和离焦结构的匀化效果比较 (a) 传统结构; (b) $f_{A2} = f_{A1}$ 的离焦结构; (c) $f_{A2} = f_{A1} + \delta$ 的离焦结构

Fig. 15. Comparison of homogenization effects between conventional and defocused structures: (a) Conventional structure; (b) defocused structures and $f_{A2} = f_{A1}$; (c) defocused structures and $f_{A2} = f_{A1} + \delta$.

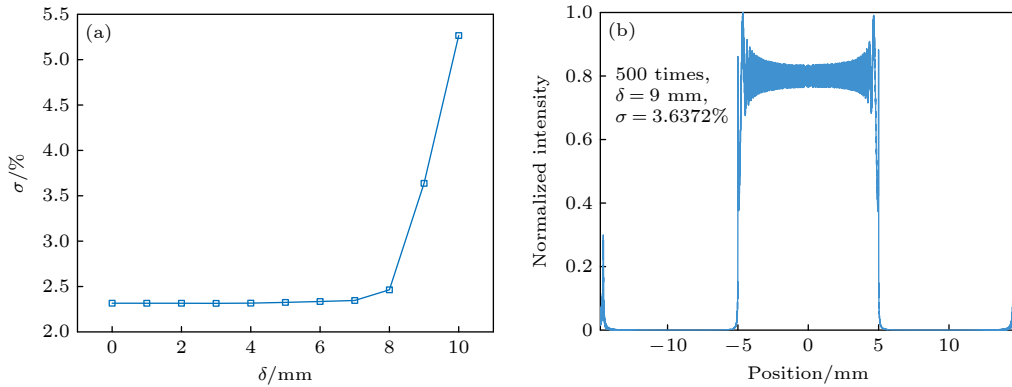


图 16 离焦量对匀化效果的影响 (a) 不均匀性随离焦量的变化; (b) $\delta = 9$ mm 的照明面光强分布

Fig. 16. Influence of the amount of defocusing on the homogenization effects: (a) The variation of non-uniformity with the amount of defocusing; (b) distribution of intensity on the illuminated surface for $\delta = 9$ mm.

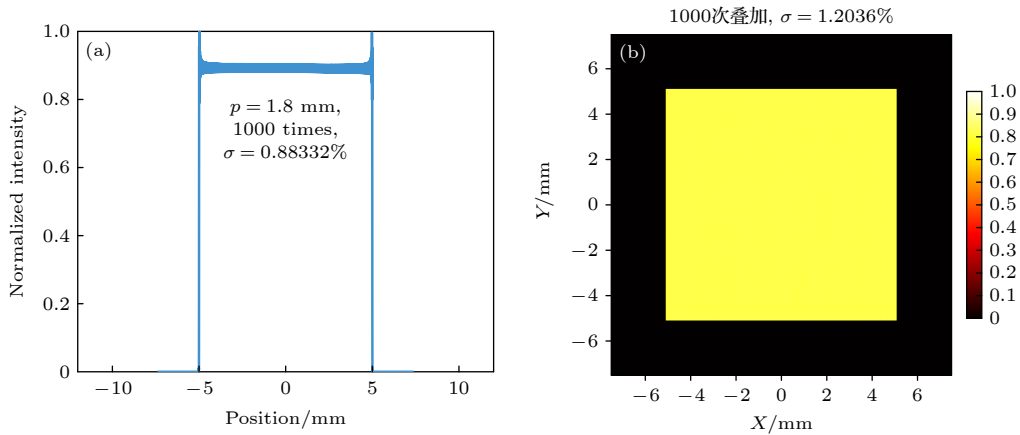


图 17 $p = 1.8$ mm, $f_A = 9$ mm 的衍射型匀化系统的照明光强分布 (a) 光强一维分布图; (b) 光强二维分布图

Fig. 17. Illumination intensity distribution of a imaging-type homogenizing system with $p = 1.8$ mm and $f_A = 9$ mm: (a) 1D distribution of intensity; (b) 2D distribution of intensity.

行随机相位调制并光强叠加, 随着叠加次数增加匀化效果也会提高, 叠加次数较少时不均匀性降低效果明显, 但叠加 600 次以后不均匀性降低速度十分缓慢. 与衍射型系统相似的是, 在一定范围内子孔径越大, 匀化效果越好, 但子孔径过大会无法消除

入射光强分布的影响, 使均匀性变差. 与衍射型系统不同的是, 成像型系统匀化效果对蝇眼透镜焦距的变化不敏感, 这降低了蝇眼匀化系统的设计和使用难度. 根据上述结论, 由 $p = 1.8$ mm, $f_A = 9$ mm 的蝇眼透镜构建的成像型蝇眼随机相位调

制匀化系统, 相位调制并叠加 1000 次的匀化效果如图 17 所示, 在 100 mm^2 的方形照明区域内获得不均匀性低至 1.2%.

4 结 论

本文对蝇眼透镜匀化系统进行了理论和仿真研究, 使用随机相位调制并统计平均的方法, 解决了蝇眼透镜子光束干涉引起的照明面梳状干涉图案问题. 为进一步提高照明均匀度, 使光强分布更接近于平顶分布, 对蝇眼随机相位调制匀化系统的参数进行调谐研究, 在束腰半径 3 mm 的高斯光输入下, 研究了蝇眼子孔径、焦距和照明面光强累加次数对于匀化效果的影响, 从而为实际光路设计提供了理论指导. 同时提出, 对于成像型蝇眼随机相位调制匀化系统, 在实际装调要求下, 需要保证第 1 个蝇眼透镜在第 2 个蝇眼透镜的前焦面上, 以保持较好的匀化效果. 最终通过优化蝇眼透镜参数, 在 $p = 1.8 \text{ mm}$, $f_A = 9 \text{ mm}$ 的成像型蝇眼随机相位调制匀化系统中, 在 100 mm^2 的方形照明区域内, 将不均匀性 117% 的高斯光束匀化为不均匀性 1.2% 的平顶光束. 这种蝇眼透镜随机相位调制匀化系统结构简单、能量损失小、照明均匀性好, 可对输入为高相干激光且分辨率要求较高的系统进行照明匀化, 未来可用于深紫外掩模缺陷检测等领域.

参考文献

- [1] Yu D Y, Tan H Y 2006 *Engineering Optics* (Beijing: China Machine Press) p165 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 2006 工程光学 (北京: 机械工业出版社) 第 165 页]
- [2] Xu Z Y 2006 *Laser Infrared* **36** 737 (in Chinese) [许祖彦 2006 激光与红外 **36** 737]
- [3] Deng L X, Dong T H, Fang Y W, Yang Y H, Gu C, Ming H, Xu L X 2021 *Opt. Laser Tech.* **135** 106686
- [4] Wierer J J, Tsao J Y 2015 *Phys. Status Solidi A* **212** 980
- [5] Farshidianfar M H, Khajepouh A, Gerlich A P 2017 *Surf. Coat. Tech.* **315** 326
- [6] Takada A, Tojo T, Shibuya M 2008 *J. Micro-nanolith. Mem.* **7** 043010
- [7] Dickey F M 2014 *Laser Beam Shaping Theory and Techniques* (2nd Ed.) (Boca Raton: CRC Press) pp406–414
- [8] Deng X M, Liang X C, Chen Z Z, Yu W Y, Ma R Y 1986 *Appl. Opt.* **25** 377
- [9] Streibl N, Nölscher U, Jahns J, Walker S 1991 *Appl. Opt.* **30** 2739
- [10] Zheng X, Dai S Y, Zhang Y Y, Zhao S 2023 *Acta Opt. Sin.* **43** 1014005 (in Chinese) [郑昕, 戴深宇, 张玉莹, 赵帅 2023 光学学报 **43** 1014005]
- [11] Zhang F, Zhu J, Yang B X, Huang L H, Hu X B, Xiao Y F, Huang H J 2013 *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems* Beijing, China, November 17–19, 2013 p904619
- [12] Jin Y H, Hassan A L, Jiang Y J 2016 *Opt. Express* **24** 24846
- [13] Büttner A, Zeitner U D 2002 *Opt. Eng.* **41** 2393
- [14] Fu S Z, Sun Y Q, Huang X G, Wu J, Zhou G L, Gu Y 2003 *Chin. J. Lasers* **30** 129 (in Chinese) [傅思祖, 孙玉琴, 黄秀光, 吴江, 周关林, 顾援 2003 中国激光 **30** 129]
- [15] Harder I, Lano M, Lindlein N, Schwider J 2004 *Photon Management Strasbourg, France, April 26–30, 2004* p99
- [16] Wippermann F, Zeitner U D, Dannberg P, Bräuer A, Sinzinger S 2007 *Opt. Express* **15** 6218
- [17] Cao A, Pang H, Wang J Z, Zhang M, Shi L F, Deng Q L 2015 *IEEE Photonics J.* **7** 2400207
- [18] Kopp C, Ravel L, Meyrueis P 1999 *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* **1** 398
- [19] Pei X Z, Liang Y H, Wang F, Zhu L X, Xie C Q 2019 *Acta Photonica Sin.* **48** 314001 (in Chinese) [裴宪梓, 梁永浩, 王菲, 朱效立, 谢常青 2019 光子学报 **48** 314001]
- [20] Zhao X H, Gao Y Q, Li F J, Ji L L, Cui Y, Rao D X, Feng W, Ma W X 2019 *Appl. Opt.* **58** 2121
- [21] Li F J, Gao Y Q, Zhao X H, Xia L, Liu D, Ji L L, Feng W, Rao D X, Cui Y, Shi H T, Liu J N, Ma W X, Sui Z 2020 *Appl. Opt.* **59** 2976
- [22] Voelkel R, Weible K J 2008 *Optical Fabrication, Testing, & Metrology III* Glasgow, Scotland, United Kingdom, September 2–5, 2008 p71020J
- [23] Oohashi K, Inoue H, Nomura T, Ono A, Tabata M, Suzuki H 2000 *Photomask and Next Generation Lithography Mask Technology VII* Kanagawa, Japan, April 12–13, 2000 p452
- [24] Goodman J W (translated by Chen J B, Qin K C, Cao Q Z) 2020 *Introduction to Fourier Optics* (Beijing: Science Press) pp145–151 (in Chinese) [古德曼 J W 著 (陈家壁, 秦克诚, 曹其智 译) 2020 傅里叶光学导论 (北京: 科学出版社) 第 145—151 页]
- [25] Li L, Han X Q, Zhao S W, Bao H Y, Wang X B 2014 *Laser Optoelectronics Prog.* **51** 011401 (in Chinese) [李丽, 韩学勤, 赵士伟, 包鸿音, 王兴宾 2014 激光与光电子学进展 **51** 011401]

Illumination homogenization of highly coherent light source based on phase modulation

Wei Jia-Xin¹⁾²⁾ Sha Peng-Fei¹⁾²⁾ Fang Xu-Chen¹⁾²⁾ Lu Zeng-Xiong¹⁾²⁾
Li Hui¹⁾²⁾ Tan Fang-Rui¹⁾ Wu Xiao-Bin^{1)2)†}

1) (*R & D Center of Optoelectronic Technology, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 8 May 2024; revised manuscript received 11 June 2024)

Abstract

When using a fly's eye lens system to homogenize highly coherent light sources, the interference effect between the sub-beams can cause a periodic speckle distribution of illumination intensity, thereby disrupting illumination uniformity. It has been shown that using a rotating optical phase-shift plate behind the fly's eye lens can eliminate interference patterns, but it only demonstrates engineering realizations. And the theoretical analysis and technical guidance on the phase modulation method and statistical averaging method for fly's eye lens homogenization systems are still lacking. In this work, a simulation model of fly's eye random phase modulation homogenization system is developed and studied in detail. Each sub-beam of the fly's eye lens is randomly phase-modulated to break the coherence condition, and the illumination intensity of multiple independent modulations is accumulated to eliminate the interference pattern. The more times the intensity is accumulated, the better the homogenization is. Meanwhile, studied in this paper are the influence of the diffraction effect on homogenization, and the influence of the sub-lens size and focal length on the homogenization, which result in the diffracting-type system and the imaging-type system respectively. For an imaging type system, it is necessary to ensure that the first fly's eye lens is in the front focal plane of the second fly's eye lens. By optimizing the parameters of the fly's eye lens and using an imaging-type system with $p = 1.8$ mm and $f_A = 9$ mm, a Gaussian beam with the non-uniformity of 117% is homogenized into a flat-topped beam with the non-uniformity of 1.2% in a square illumination area of 100 mm². This fly's eye lens random phase modulation homogenization system has a simple structure, low energy loss, and good illumination uniformity, and can be used in systems that require high coherent laser input and high resolution. This technology can be used in the field of deep-ultraviolet mask defect detection.

Keywords: high-coherence light, homogenization, fly's eye lens, phase modulation

PACS: 41.85.Ct, 03.65.Yz, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.73.20240644

† Corresponding author. E-mail: wuxiaobin@ime.ac.cn

基于相位调制的高相干光源照明匀化方法

魏嘉昕 沙鹏飞 方旭晨 卢增雄 李慧 谭芳蕊 吴晓斌

Illumination homogenization of highly coherent light source based on phase modulation

Wei Jia-Xin Sha Peng-Fei Fang Xu-Chen Lu Zeng-Xiong Li Hui Tan Fang-Rui Wu Xiao-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 154101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240644

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240644>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于阶梯相位调制的窄谱激光主动照明均匀性

Active illumination uniformity with narrow spectrum laser based on ladderlike phase modulation

物理学报. 2021, 70(15): 154207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210228>

基于电光晶体平板部分相位调制动态产生涡旋光束

Dynamic generation of vortex beam based on partial phase modulation of electro-optical crystal plate

物理学报. 2022, 71(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220835>

激光主动照明均匀性影响因素及其规律

Influence factors and laws of laser active illumination uniformity

物理学报. 2022, 71(15): 154203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220420>

基于多端口波导结构的宽频带声触发器

Broadband acoustic triggers based on multiport waveguide structures

物理学报. 2023, 72(16): 164301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230594>

基于匀光管的极紫外消相干和光强均匀化仿真研究

Simulation study of decoherence and light intensity uniformization for extreme ultraviolet of uniform light pipe

物理学报. 2024, 73(11): 114201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240335>

基于相位变换声镊的单个微粒平面移动操控

In-plane manipulation of single particle based on phase-modulating acoustic tweezer

物理学报. 2021, 70(21): 214302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210981>